CIMAD 24 III Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción
Madrid, España 10-14 de Junio

ANÁLISIS DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE MADERA DE UNA AVIONETA MODELO JODEL COMPOSTELA D-119-S DE 1966

Ignacio Bobadilla Maldonado [1], María Aurelia Segura López [1], Daniel F. Llana[1], Marina Arce Blanco[2], Francisco Arriaga [1]

[1] Universidad Politécnica de Madrid, ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural, Madrid, España. i.bobadilla@upm.es ORCID: 0000-0002-4627-3130. m.aurelia.segura@gmail.com. d.f.llana@upm.es ORCID: 0000-0001-7758-9456. francisco.arriaga@upm.es ORCID: 0000-0001-5535-0786
[2] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid, España. marina_arce@hotmail.com

RESUMEN

Este trabajo consiste en el análisis y diagnóstico de la estructura de madera de una avioneta modelo Jodel Compostela D-119-S de 1966. La estructura básica del fuselaje consta de un cajón de madera alargado de 6,3 m de longitud, compuesto por cuatro largueros de 18x18 mm de sección y diversos travesaños de 8x18 mm, todo ello recubierto con tableros contrachapados de 2-3 mm de espesor y una tela encolada y lacada. Se ha efectuado una inspección visual detallada y una toma de muestras para su posterior análisis en laboratorio, y se han aplicado diversas técnicas no destructivas sobre las piezas objeto de estudio para estimar su humedad y sus propiedades físicas y mecánicas. Se ha identificado la madera de los listones (largueros y travesaños) como *Pinus sylvestris* L / *Pinus nigra* Arn. y la de los tableros contrachapados como *Aucoumea klaineana* Pierre. Se han obtenido resultados desfavorables respecto al estado de conservación de la estructura, detectándose un ataque de carcoma común, *Anobium punctatum* De Geer, que afecta al 50% de los listones de pino analizados. Las propiedades físico-mecánicas residuales estimadas para las piezas de madera de pino analizadas pertenecientes a la estructura están por debajo de los umbrales normales para la especie, siendo la velocidad de propagación media de ondas de impacto de 3687 m/s, un 33% menor que en madera sana. El módulo de elasticidad dinámico estimado toma valores medios de 6189 N/mm^2, un 56% inferiores a lo normal en una madera sana. Estos valores se deben principalmente al ataque patógeno de carcoma identificado. En los tableros contrachapados se han detectado mohos superficiales que no afectan a sus propiedades. La velocidad de propagación de ondas de impacto media registrada es de 3005 m/s, la densidad media estimada de 498 kg/m^3 y el módulo de elasticidad medio de 3628 N/mm^2, superan por tanto los valores normales para este tipo de tablero.

PALABRAS CLAVE

Patología de la madera, hongos, carcoma, métodos no destructivos, ondas de impacto, penetrómetro, peritación.

1 INTRODUCCIÓN

El uso de madera en aviación tuvo su apogeo durante las primeras décadas del siglo XX, especialmente antes de la Segunda Guerra Mundial. En esa época, muchos aviones, incluidos modelos icónicos como el Boeing 247 y el Douglas DC-3, utilizaban estructuras de madera en combinación con tela para sus alas y fuselajes.

La madera fue muy apreciada en la industria aeronáutica por su ligereza y resistencia, además de ser un material abundante y de bajo costo en comparación con metales como el aluminio. Sin embargo, con los avances tecnológicos y la necesidad de aeronaves más grandes y veloces, la industria se orientó hacia materiales metálicos y compuestos.

A medida que la aviación evolucionaba, la madera dejó de ser la elección principal para la construcción de aviones, aunque todavía hoy día se utiliza en ciertos modelos de avionetas ligeras y planeadores. La madera utilizada en aviación debe ser de alta calidad, liviana, fuerte y resistente a la humedad y a las variaciones de temperatura. Las coníferas como pinos y abetos y los tableros contrachapados son habituales debido a estas características.

El uso de madera en la construcción de avionetas comerciales ha disminuido considerablemente, pero todavía existen algunos modelos que incorporan este material, especialmente en ciertas partes de la estructura. Un ejemplo es el WACO YMF-5, una avioneta clásica de estilo biplano que ha mantenido el diseño tradicional de madera y tela en algunas de sus partes, como las alas. Este modelo combina la nostalgia de la aviación clásica con tecnologías modernas para cumplir con los estándares de seguridad y rendimiento actuales.

Es importante destacar que, en general, la mayoría de las avionetas modernas utilizan materiales compuestos y metales ligeros en lugar de madera, debido a las ventajas en términos de peso, durabilidad y mantenimiento. Sin embargo, hay entusiastas y fabricantes que optan por la madera por razones estéticas y de tradición en el diseño de ciertos modelos de avionetas. La avioneta Jodel D-119-S Compostela, objeto de este estudio, es una variante del modelo original, Jodel D-112 diseñado en 1946 por los franceses Edouard Joly y Jean Delmontez. La empresa española Aero Difusión S.L adquirió la licencia de fabricación en ese mismo año, y más tarde, en 1958 presentó al mercado el modelo D-119.

Aproximadamente en 1962, Fernando de Caralt Cera, ingeniero aeronáutico, rediseñó y mejoró el modelo, en el aeródromo "Parayas" en Santander. Esta nueva variante se denominó D-119-S, cuenta con un motor de 90 CV ligeramente modificado respecto al francés y pasó a ser conocido como "Compostela". Es una avioneta biplaza idónea para la formación y entrenamiento de pilotos [1], [2] y [3].
La avioneta concreta objeto de nuestro estudio es de 1966, con número de serie E-121 y matrícula EC-BCK, que fue anteriormente utilizada por la empresa Aerofoto y el Real Aero Club de Asturias y que el anterior propietario de la misma, José Emilio Álava Quintana, la ha tenido guardada unos 10 años aproximadamente en un almacén parcialmente abierto en Asturias, al norte de España. Posteriormente, en 2017 fue adquirida en donación por la Fundación Infante de Orleans [4] y trasladada a un hangar en el aeródromo Teniente General Vives Camino, propiedad del Aeroclub de Guadalajara, situado en el término municipal de Robledillo de Mohernando, Guadalajara, España.

2 OBJETIVO

Una vez transferida la propiedad de la avioneta a la Fundación Infante de Orleans, ésta solicita la determinación del estado de conservación de su estructura de madera dando una valoración objetiva de los daños encontrados, así como una propuesta de actuación. Para cumplir este objetivo se planteó una inspección visual detallada, la correspondiente toma de muestras necesarias para determinar las especies de madera de estructura y recubrimiento y la patología detectada. Además, se realizaron ensayos no destructivos (END) para estimar las propiedades físicas y mecánicas y caracterizar las piezas componentes de la estructura.

3 MATERIAL Y MÉTODOS

Para abordar los objetivos propuestos se utilizó el equipamiento habitual de inspección de una estructura de madera, adaptándolo en este caso a las características especiales de la avioneta (tamaño de la estructura y de las piezas, accesibilidad, etc.). El equipo básico para la inspección consiste en: ropa de trabajo resistente y cómoda, mascarilla anti polvo, guantes, cuaderno de toma de datos, martillo y formón para toma de muestras, punzón y penetrómetro (Pilodyn), bolsas y tubos porta muestras, luz, casco, xilohigrómetros de resistencia eléctrica (marca Gann) y capacitivo de contacto (marca Humy), y equipo de transmisión de ondas de impacto, Microsecond Timer MST (marca Fakopp) (Figura 1, A, B y C).
Además, se contó con los siguientes equipos de laboratorio para el análisis de las muestras: estufa y balanza para el cálculo de la humedad de la madera, baño termostático y micrótomo para obtención de muestras de microscopía, así como microscopio y lupa para las identificaciones, tanto de madera como de patógenos.

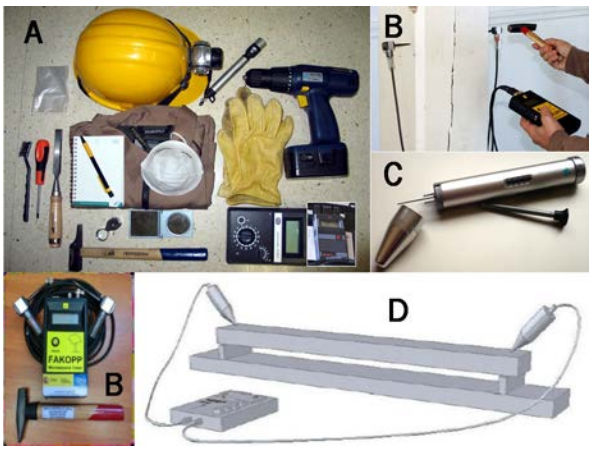


Figura 1: Equipamiento de inspección. A: Ropa y equipo básico de trabajo. B: Equipo de propagación de ondas de impacto MST de Fakopp. C: Penetrómetro Pilodyn. D: Método indirecto en cara para la medición de la velocidad de propagación de ondas.

Los ensayos ND realizados siguen el protocolo habitual de medición en cara vista, realizando por tanto ensayos indirectos en cara de la velocidad de propagación de ondas de impacto con el equipo comercial MST (Fakopp) (Figura 1, D). Se realizaron dos correcciones de la velocidad de propagación, una primera que tiene en cuenta la humedad y otra por la medida indirecta en cara de la velocidad. En este último caso, dado que los modelos existentes son para madera estructural de grandes dimensiones que no se adaptan bien a la situación particular de esta estructura, se ha decidido hacer unos nuevos modelos de corrección, tomando para ello dos grupos de 8 probetas, 8 listones de pino silvestre de 600 mm de longitud y sección de 20x30 mm y 8 tiras de tablero contrachapado de 50x600 mm y 3 mm de espesor y de características similares al original. En estas probetas se realizaron con el MST medidas directas de testa a testa e indirectas en cara, de la velocidad de propagación.
La estimación de la densidad y el estado del interior se auscultó con ensayos de penetración con el equipo Pilodyn 6J Forest (Proceq), y dado que el equipo genera un impacto violento, se limitaron a las piezas de mayor sección.

Toda la inspección se realiza sobre la parte accesible de la estructura completa de la avioneta. La estructura del fuselaje se inspecciona desde el interior y se realizan los ensayos ND sobre todas aquellas piezas a las que se puede llegar con los equipos. En la Figura 2 se muestra el armazón con las piezas inspeccionadas numeradas.

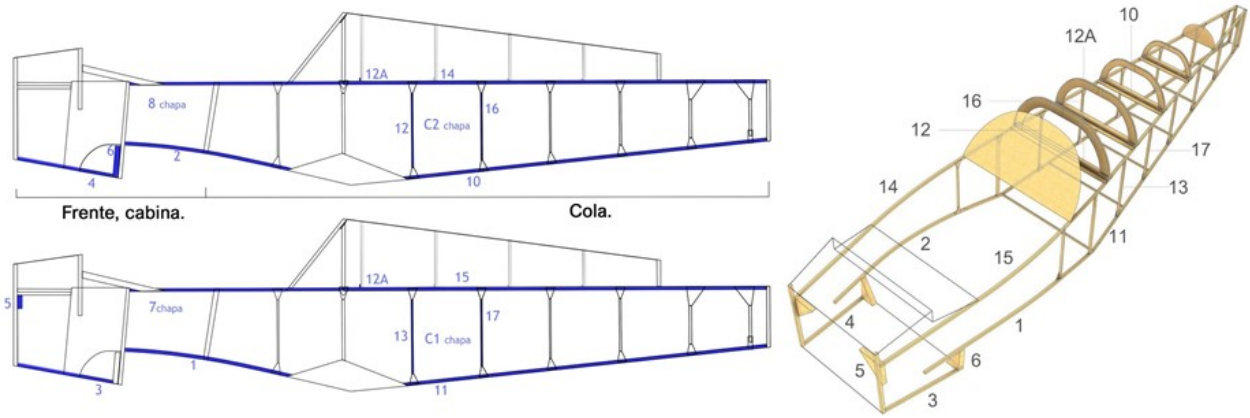


Figura 2: Plano general y modelo 3d de la estructura de la avioneta. A la izquierda de la Figura el plano de las secciones derecha (arriba) e izquierda (abajo) del fuselaje con las piezas inspeccionadas marcadas en azul y con la numeración correspondiente, pares derecha e impares izquierda. En la parte derecha de la imagen se puede ver la reconstrucción 3d esquemática con la numeración.

En las alas solo se tiene acceso a las piezas centrales que conectan con el fuselaje, el resto queda cubierto con la tela y el hueco es tan estrecho que no permite el acceso de equipos de inspección, por tanto, la toma de muestras y los ensayos se limitan en este caso a esa zona central.

4 RESULTADOS

4.1.- INSPECCION VISUAL Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

En la inspección visual del interior accesible de la estructura, se observaron piezas afectadas con orificios de salida de insectos, imagos muertos en la base del fuselaje y en algunas piezas horizontales, y detritos (serrín fino) en la proximidad de los orificios de salida en algunos listones. Se observó así mismo que en la superficie de los tableros aparece una formación algodonosa blanquecina formando manchas repartidas de forma aleatoria. Se tomaron muestras de madera sana y afectada, tablero, manchas blanquecinas, insectos y detritos para su análisis en laboratorio.

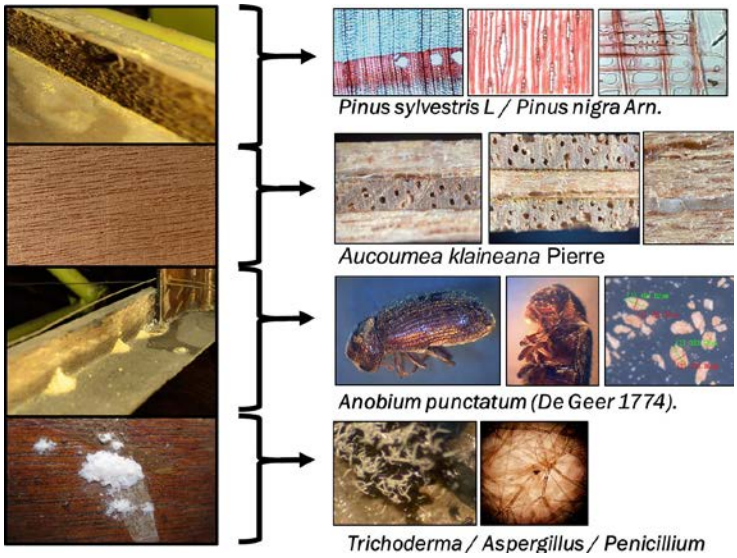


Figura 3: Esquema de los análisis e identificaciones realizados en el laboratorio tras la toma de muestras.

Tras los análisis anatómicos y morfológicos de las muestras los resultados son los siguientes (Figura 3):

La madera se corresponde con las especies *Pinus sylvestris* L. / *Pinus nigra* Arn. [5]. No es posible diferenciar anatómicamente estas dos especies de pino, por lo que podría ser cualquiera de ellas. No obstante, por su mayor disponibilidad en toda Europa, y porque sus propiedades físicas y mecánicas son algo inferiores, para quedarnos del lado de la seguridad, optamos por escoger el pino silvestre. El tablero contrachapado resulta ser de tres chapas de la especie *Aucoumea klaineana* Pierre, (Okume) [6]. Esta especie era muy común en este tipo de tableros, sobre todo en los años 60-70, actualmente en nuestra zona geográfica (sur de Europa), es más habitual el chopo y el abedul. Tanto los insectos adultos como los detritos analizados corresponden a la carcoma común de la especie *Anobium punctatum* De Geer. Esta especie es muy frecuente en la franja norte de la península ibérica [7]. Por último, las formaciones algodonosas de la superficie de los tableros son mohos de alguno de los géneros habituales, *Aspergillius, Trichoderma o Penicillium*.

Dadas las condiciones ambientales del período de almacenaje en Asturias, que se prolongó durante 10 años, no es de extrañar la presencia de las carcomas y los mohos, ya que las temperaturas medias anuales son suaves, en torno a 15ºC, y la humedad relativa del aire esta frecuentemente entre 70 y 80%. Estas condiciones nos llevan a humedades de equilibrio higroscópico de la madera (HEH) del 18%, próximas al umbral de peligro para los patógenos incluidos los mohos (20%)

y perfectas para el desarrollo de las carcomas, que pueden desarrollarse con humedades de equilibrio incluso inferiores (12%) [8].
En lo que se refiere a la extensión e importancia de los patógenos identificados, la carcoma afecta al 50% de las piezas analizadas, y en algunos casos la presencia de orificios de salida es abundante. Los mohos por su parte afectan a la práctica totalidad de los tableros, aunque resultan más frecuentes en la parte más alta de la cola. En la Figura 4 se puede observar la distribución de las piezas afectadas.

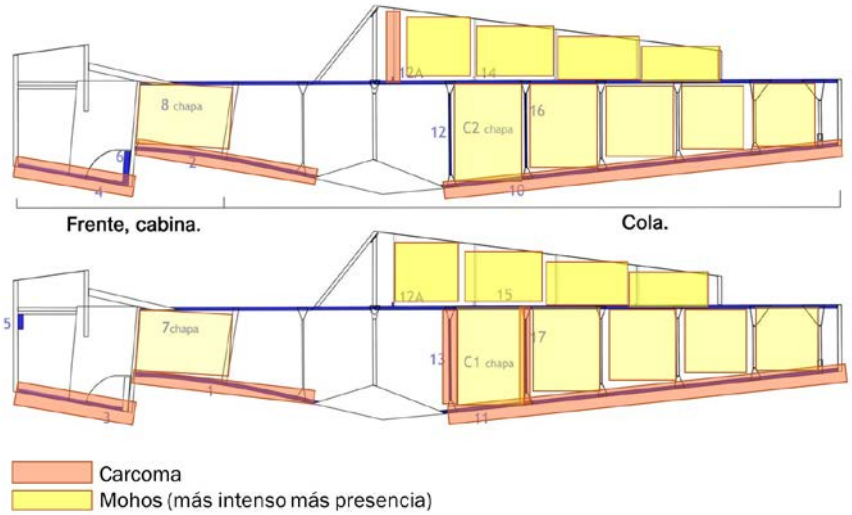


Figura 4: Piezas afectadas por los patógenos identificados. Las marcas naranjas hacen referencia a los listones de pino atacados por la carcoma, las marcas amarillas a los tableros afectados por los mohos, a mayor intensidad de color mayor presencia.

Se observa en general una mayor presencia de patógenos en la zona de cola, menos ventilada, en toda la parte inferior del fuselaje, más próxima al suelo, y en la parte izquierda, más próxima a zonas abiertas al exterior durante el almacenaje en Asturias.

4.2.- ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (ND)

En cuanto a las mediciones no destructivas realizadas in situ, las tablas 1 y 2 recogen de forma resumida los resultados medios obtenidos por zonas de: humedad, velocidad de propagación de ondas de impacto corregida, MOE dinámico, MOE estático estimado y densidad estimada. Se han separado las piezas de madera maciza y los tableros para mayor comodidad en la interpretación de los resultados. Las densidades en la madera han sido estimadas con Pilodyn mediante el modelo: $\rho_{est}=650,7 - 14,1*P$ (R^2 0,35), (siendo P la profundidad de penetración en mm) [9]. El resultado obtenido en este caso no requiere corrección dado que la variación en la medida del propio equipo es de un orden superior a la influencia de la humedad en valores comprendidos entre 8 y 14% [10]
En el caso de la velocidad de propagación de ondas, el valor final considerado es el resultante tras dos correcciones, una por humedad, ya que los valores estándar lo son para la humedad normal del 12%, y otra por la medida indirecta en cara, ya que los modelos utilizados para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas, obtenidos en bibliografía, son realizados generalmente por medición directa de testa a testa, y en las inspecciones rara vez se tiene acceso a las testas de las piezas analizadas [11].
Las velocidades se han corregido por humedad mediante el modelo: $V_{12}=Vh/[1-0,064(H-12)]$ [12]. Las correcciones por la medida indirecta en cara se han hecho mediante un modelo propio desarrollado para este trabajo: $V_{corr}=0,9867*V_{12}+373$ (R^2 0,97). Estos modelos se describen en el apartado 4.3.
El módulo de elasticidad (MOE) dinámico se ha calculado mediante la ecuación: $MOE_{dyn}= \rho*V^2$, y como módulo estático, para simplificar el cálculo se ha estimado un 0,75 del valor del dinámico, de acuerdo con los resultados obtenidos en madera estructural de pino silvestre [13].

Tabla 1: Valores medios por zona de los ensayos no destructivos. Estimaciones de humedad en %, velocidades de propagación de ondas de impacto corregidas, módulos de elasticidad dinámico y estático y densidad en las piezas de madera de pino de la estructura del fuselaje y las alas.

Zona de medida	H%	V_{corr} (m/s)	$MOE_{dyn.}$ (N/mm^2)	MOE (N/mm^2)	ρ_{est} (kg/m^3)
Cabina Izda.	11	3330	4331	3248	427
Cola Izda.	9	3102	4159	3119	418
Cabina Dcha.	10	3456	4659	3494	427
Cola Dcha.	10	4225	8231	6173	456
Ala	11	4100	8532	6399	500

Globales	10	3687	6189	4642	445

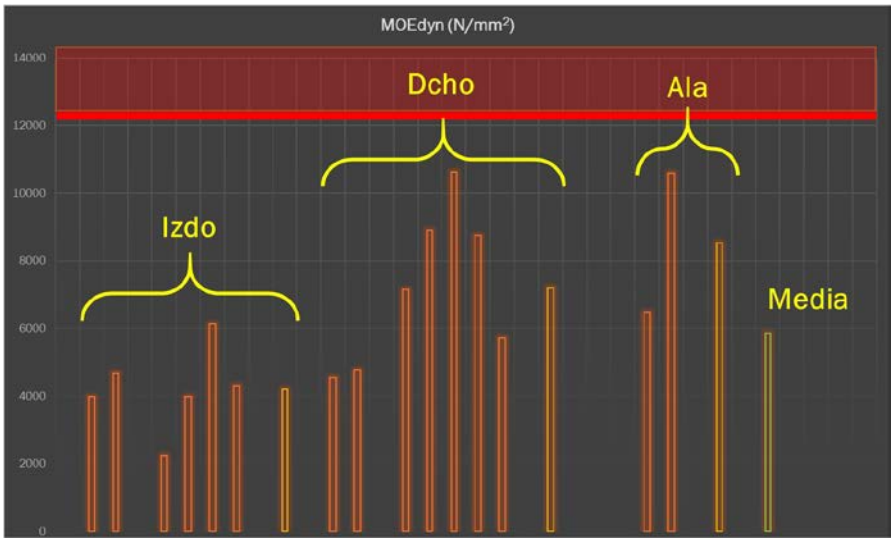


Figura 5: Representación gráfica de los módulos de elasticidad dinámicos calculados en las piezas de madera del fuselaje y las alas. En naranja oscuro piezas individuales, en naranja claro valores medios por zona. Se puede observar la diferencia de resultados entre los lados derecho e izquierdo del fuselaje, y las alas. La línea y franja rojas en la parte superior del gráfico indican los valores umbral de la variable en madera sana de la misma especie. Como se ve, ninguno de los registros alcanza el umbral mínimo.

En los tableros contrachapados las velocidades se han corregido por humedad mediante el mismo modelo utilizado en madera maciza. Además, se han corregido por la medida indirecta en cara mediante modelo propio desarrollado para este trabajo: V_{corr}=1,09*V_{12} -212 (R^2 0,46). Las densidades han sido estimadas con MST mediante modelo: ρ_{est}=0,0642*Vcorr+309 (R^2 0,71) y el MOE se estima mediante el modelo: MOE= 1,71*Vcorr – 1511 (R^2 0,79) [14].

Tabla 2: Resultados medios por zonas de los ensayos no destructivos y las estimaciones de humedad (H) en %, velocidades de propagación de ondas de impacto corregidas (Vcorr), módulos de elasticidad estático (MOE) y densidad (ρ) en los tableros contrachapados.

Zona de medida	**H%**	**V_{corr} (m/s)**	**MOE (N/mm²)**	**ρ_{est} (kg/m³)**
Cabina Izda.	5	2330	2473	458
Cola Izda.	10	3442	4374	524
Cabina Dcha.	5	2777	3238	484
Cola Dcha.	10	3473	4428	526
Global	7.5	3005	3628	498

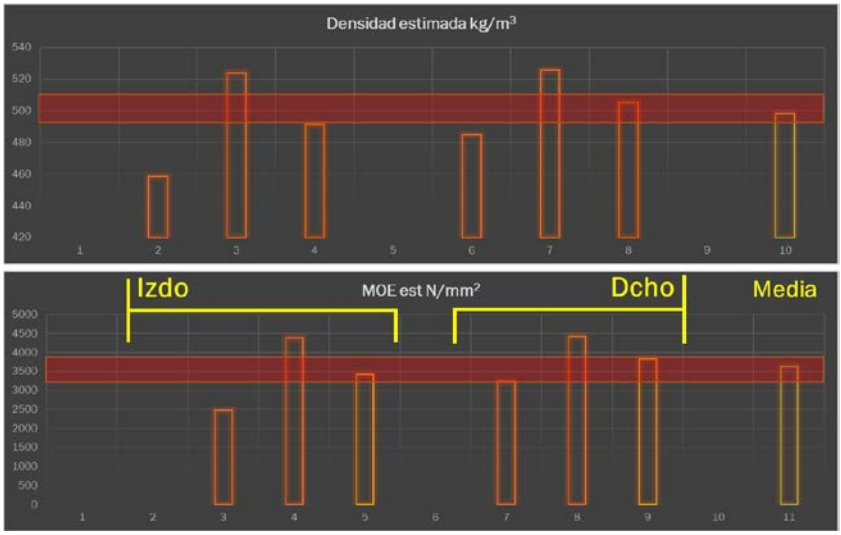


Figura 6: Representación gráfica de los módulos de elasticidad y densidades estimadas en las piezas de tablero del fuselaje. En naranja oscuro piezas individuales, en naranja claro valores medios por zona. Se puede observar la diferencia de resultados entre los lados derecho e izquierdo. Las franjas rojas en la parte superior de cada gráfico indican los valores umbrales de la variable en tableros sanos de características similares. Casi todos los valores y todas las medias alcanzan e incluso superan los mínimos.

Las figuras 5 y 6 muestran la distribución de los resultados en todas las piezas medidas y su comparación con la especificación para el material sano de referencia (valores medios). Se observa con claridad como los valores obtenidos para la madera del fuselaje quedan muy por debajo de lo esperado en madera sana, ello es debido al ataque de carcoma que ha debilitado muchas de las piezas analizadas. Se observa así mismo que el lado izquierdo esta más afectado que el derecho. En cuanto a los tableros contrachapados, los valores estimados de sus propiedades físicas y mecánicas están dentro de lo normal, por lo que se concluye que los mohos no han afectado internamente al tablero.

4.3.- CORRECCIÓN DE LA VELOCIDAD POR MEDICIÓN INDIRECTA EN CARA

Los modelos de corrección que se plantean en este trabajo se han realizado en probetas similares a las pertenecientes al fuselaje de la avioneta, es decir, listones de madera de pequeña sección (20x30 mm) y tiras de tablero de características similares (3 mm de espesor y densidad análoga). Los resultados obtenidos en estos ensayos se recogen en la Tabla 3 y los modelos en la Figura 7. Se concluye de este estudio que las diferencias entre las medidas directas e indirectas realizadas son mayores en madera maciza, en torno a un 7%, frente a los tableros, sobre un 2%, sin embargo, las diferencias son estadísticamente más significativas en los tableros debido a la mayor homogeneidad de los datos. No obstante, se decide aplicar ambos modelos de corrección en las piezas ensayadas de la estructura de la avioneta.

Tabla 3: Velocidades de propagación de ondas de impacto en listones de madera de pino silvestre de 20x30 mm de sección y probetas de tablero contrachapado de abedul de 3 mm de espesor y 495 kg/m^3 de densidad. C=Contrachapado; M=Madera; CV=Coeficiente de variación; Vi=Velocidad indirecta en cara; Vd=Velocidad directa testa a testa

PROBETA	Tipo	Vi m/s	Vd. m/s	**PROBETA**	Tipo	Vi m/s	Vd. m/s
T1	C	3314	3456	**M1**	M	4143	4511
T2	C	3218	3333	**M2**	M	4056	4412
T3	C	3218	3242	**M3**	M	3372	3681
T4	C	3237	3333	**M4**	M	4143	4444
T5	C	3164	3224	**M5**	M	3537	3896
T6	C	3256	3278	**M6**	M	4328	4724
T7	C	3256	3371	**M7**	M	3867	4110
T8	C	3294	3278	**M8**	M	4462	4688
CVC%		1	2	**CVM%**		9	9

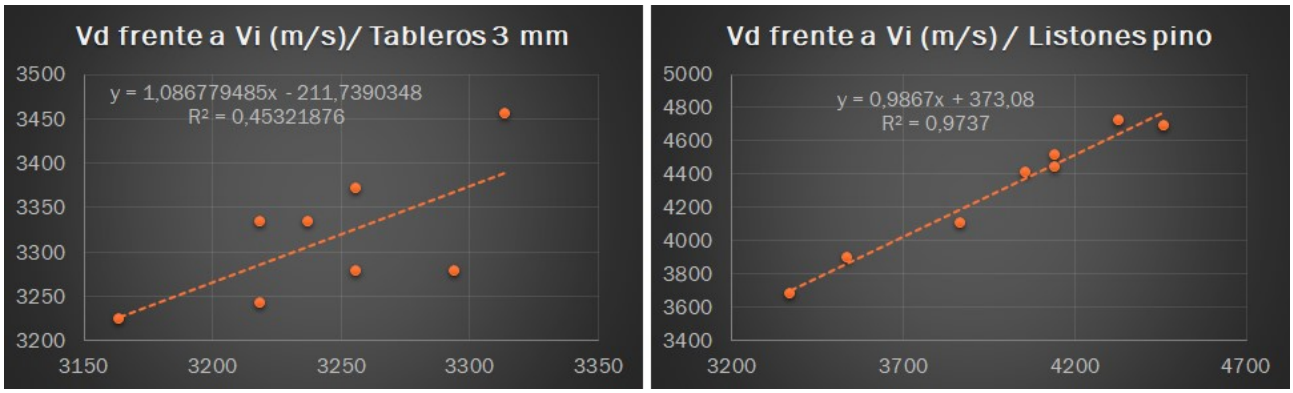


Figura 7: Modelos de corrección por medición indirecta en cara en tableros contrachapados de 3 mm de espesor y en listones de madera de pino silvestre.

5 CONCLUSIONES

De la inspección visual y el posterior análisis de laboratorio se concluye que la especie de madera de la estructura es *Pinus sylvestris* L. / *Pinus nigra* Arn. y la especie de madera de los tableros contrachapados es *Aucoumea klaineana* Pierre. Una buena parte de la estructura de la avioneta (50%) está afectada por carcoma común (*Anobium punctatum* De Geer), y la mayoría de los tableros que conforman la carcasa del fuselaje (70%) están afectados por mohos superficiales. Este estado patológico es debido a las condiciones de almacenamiento, que han propiciado elevadas humedades relativas del aire y HEH por encima de los umbrales recomendados (18%).

El ataque de la carcoma ha afectado a las piezas de madera de forma notable, lo cual se pone de manifiesto en la pérdida de un 33% en la velocidad de propagación de ondas de impacto (3687 m/s) y de un 56% en el MOE dinámico (6189 N/mm^2) con respecto a los valores habituales en madera sana de la misma especie, lo cual compromete la estabilidad estructural del conjunto. Por su parte los mohos parecen afectar solo a la superficie de los tableros dado que son más exigentes en cuanto a los umbrales de humedad y parecen haber proliferado en menor medida. Los tableros por tanto

presentan velocidades de propagación y MOEs que en general se consideran normales (3005 m/s y 3628 N/mm^2 respectivamente). El lado izquierdo del fuselaje es el más afectado, posiblemente por haber estado más expuesto durante el almacenamiento.

La avioneta no se encuentra por tanto en condiciones de volar y si se desea reutilizarla para tal fin, tendría que sustituirse gran parte de la estructura de madera del fuselaje. Los tableros en general si pueden reutilizarse tras una limpieza superficial de los mohos. Para su uso como elemento de exposición solo sería necesaria una limpieza y un tratamiento curativo para la carcoma, ya que la resistencia residual de la estructura es suficiente para la estabilidad en tierra de la avioneta. En estos casos, dado el tamaño reducido de la estructura, y para evitar el desmontaje completo, suele ser habitual el uso de sistemas de anoxia o tratamiento con gases.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Infante de Orleans por facilitarnos el acceso a la avioneta y los datos históricos de su vida útil. Al Grupo de Investigación Construcción con Madera (GICM) de la UPM por facilitarnos el material y los equipos de ensayo.

REFERENCIAS

[1] Lluch, J. M. (2013). Reseña de la aviación de construcción amateur en España. AEROPLANO. Revista de la Aeronáutica, 31, 160-177.

[2] Casablancas, L. E. (ag.2020). Aviación por Leandro. Obtenido de http://leandroaviacion.blogspot.com/2013/02/1955-jodel-d-112-aero-difusion-foto.html: http://leandroaviacion.blogspot.com.

[3] Segura López, Mª Aurelia (2021). Inspección y diagnóstico de la estructura de madera de una Avioneta. Análisis del estado de conservación de la estructura de madera de una avioneta modelo Jodel Compostela D-119-S, propiedad de la Fundación Infante de Orleans. Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural (UPM).

[4] FIO. (Ene. 2020). Fundación Infante de Orleans. Obtenido de https://fio.es/2019/03/27/jodel-d-119-s-compostela-1950-2/

[5] García Esteban, L., De Palacios de Palacios, P., Guindeo Casasús, A., García Esteban Ly., Lázaro Durán, I., González Fernández, L., Rodríguez Labrador, Y., García Fernández F., Bobadilla Maldonado, I., Camacho Atalaya. (2002). Anatomía e identificación de maderas de coníferas a nivel de especie. ISBN: 84-86793-89-0. 421pp. Ed. Fucovasa-Mundiprensa.

[6] Fernández-Golfín, JI. Conde García, M. Cabezas Martínez, JA. Sánchez Gonzalez, M. Fernandez de Simón, MB. Vélez Tebar, MD y Cervera Goy, MT. (2022). Fichas técnicas para la identificación botánica de maderas comerciales. Ministerio para la transición ecológica. INIA.

[7] Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M., Bobadilla, I., García, F. (2002). Intervención en estructuras de madera. 322 pp. Ed. Aitim.

[8] Bächle,F. Junghans, K. Niemz, P. Baum, S. Herbes, Y. (2007). Zerstörungsfreire Werkstuffprüfung im Bawesen. ETH Zurich Research Collection.

[9] Bobadilla, I., Iñiguez, G., Esteban, M., Arriaga, F., & Casas, L. (2007). Density Estimation by Screw Withdrawal Resistence and Probing in Structural Sawn Coniferus Timber. Proceeding of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.

[10] Calderón, L. Bobadilla, I. (2012). Estudio sobre la influencia del contenido de humedad de la madera en ensayos no destructivos para *Pinus nigra* Arn, *Pinus radiata* D. Don. y *Pinus sylvestris* L. Madrid. TFG. Universidad Politécnica Madrid.

[11] Arriaga, F., Llana, D.F., Esteban, M, Íñiguez-González, G. (2017). Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber. DOI 10.1515/hf-2016-0214. Holzforschung 2017; 71(9): 713–723.

[12] Llana, D.F., Hermoso, E., Bobadilla, I., Iñiguez-Gonzalez, G. (2018). Influence of moisture content on the results of penetration and withdrawal resistance measurements on softwoods. Holzforschung, 72(7), 549–555. https://doi.org/10.1515/hf-2017-0133

[13] Iñiguez, G. (2007). Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Tesis doctoral: Universidad Politécnica de Madrid.

[14] Santirso Martin, C. Bobadilla, I. (2012). Estimación del envejecimiento físico y biológico del tablero contrachapado mediante métodos no destructivos. Madrid: TFG. Universidad Politécnica Madrid.